

# DU MBSE au Digital Engineering : l'architecture comme colonne vertébrale

Gauthier Jourdain

15 avril 2026



# Table des matières

- Introduction générale
- 1** Emergence du Digital Engineering
- 2** Les défis techniques
- 3** Un besoin d'architecture globale

# Introduction

La **complexité croissante** des produits développées par les entreprises industrielles remonte au niveau de l'**entreprise** et des moyens mis en œuvre, comme le **Digital Engineering**. La gestion de cette complexité ne peut-être résolu seulement **techniquement** : c'est un problème **d'architecture** à considérer dans son ensemble **humain et technique**.



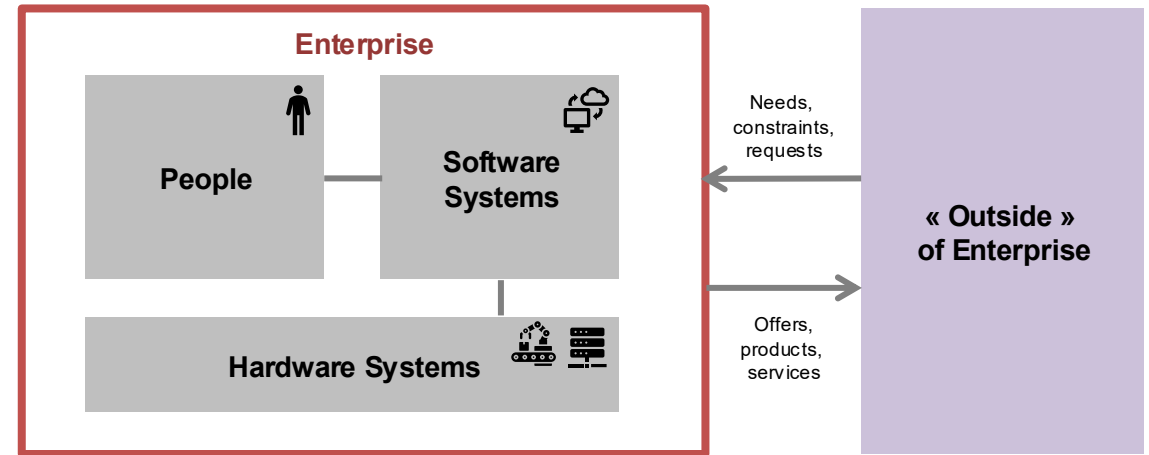
## Complexité croissante des **solutions**

Les nouvelles **technologies**, les contraintes **économiques** et **géopolitiques** poussent les systèmes produits à intégrer toujours plus de **contraintes** et de **complexité**



## Complexité qui remonte aux **moyens** mis en œuvre

Les **entreprises** déploient des **moyens** et des **technologies** fortement intégrés, comme le **digital engineering**, pour faire face aux complexités de **déploiement** et aux temps de cycle réduits



## Nécessité de l'**architecture** pour construire de cette transition

Intégrer les **outils et modèles** est un défi d'une grande **complexité**. Les **standards** comme SysML v2 et nouvelles **technologies** comme l'**IA** ne suffiront pas à résoudre les problèmes **d'alignements** : il faut des architectes au sein des entreprises pour penser cette **intégration**

# Table des matières

## ■ Introduction générale

## 1 Emergence du Digital Engineering

## 2 Les défis techniques

## 3 Un besoin d'architecture globale

1. Changement de paradigme
2. Emergence du Digital Engineering
3. Le MBSE comme pivot

# 1.1 L'Ingénierie face à un changement de paradigme

Les industries font face à la fois à une complexité qui **s'accroît**, et à des cycles qui se **réduisent**

Les systèmes **produits** intègrent de nombreuses dimensions

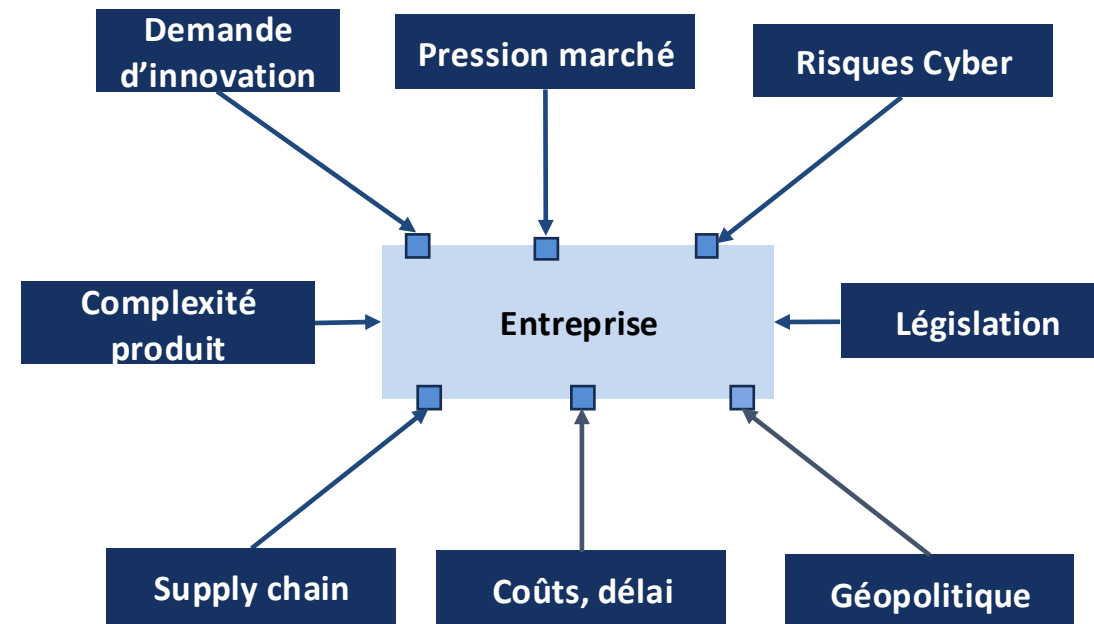
- **Digitalisation** des systèmes
- **Connectivité** (embarqué, cloud, IoT, OT ...)
- Contraintes **Cyber**
- Intégration de l'**IA**
- **Evolutivité** et **résilience** (logique ligne de produits, innovation, durabilité ...)

Les **cycles** de développement sont plus contraints

- plus **courts**, car le time to market devient central dans un monde très compétitif
- plus **itératifs**, car il faut inclure beaucoup d'innovations
- Plus **incertains**, car le marché évolue vite et il faut être agile
- **Coûts contraints** (RC et NRC) car l'économie mondiale ralentit

Les **organisations** s'intègrent dans des écosystèmes complexes :

- des **écosystèmes** économiques larges et des entreprises **étendues**
- des architectures produits **multi-niveaux**
- Des **supply chains** mondialisées



# 1.2 L'émergence du digital engineering

Le digital engineering vise à introduire une **continuité numérique** pour accélérer les cycles de développement et gagner en agilité

## 1960 Ingénierie documentaire

Approche centrée document  
Outils bureautique dominants (Word, Excel ...)  
1990 – Création de l'INCOSE

## 2005 : Introduction du MBSE

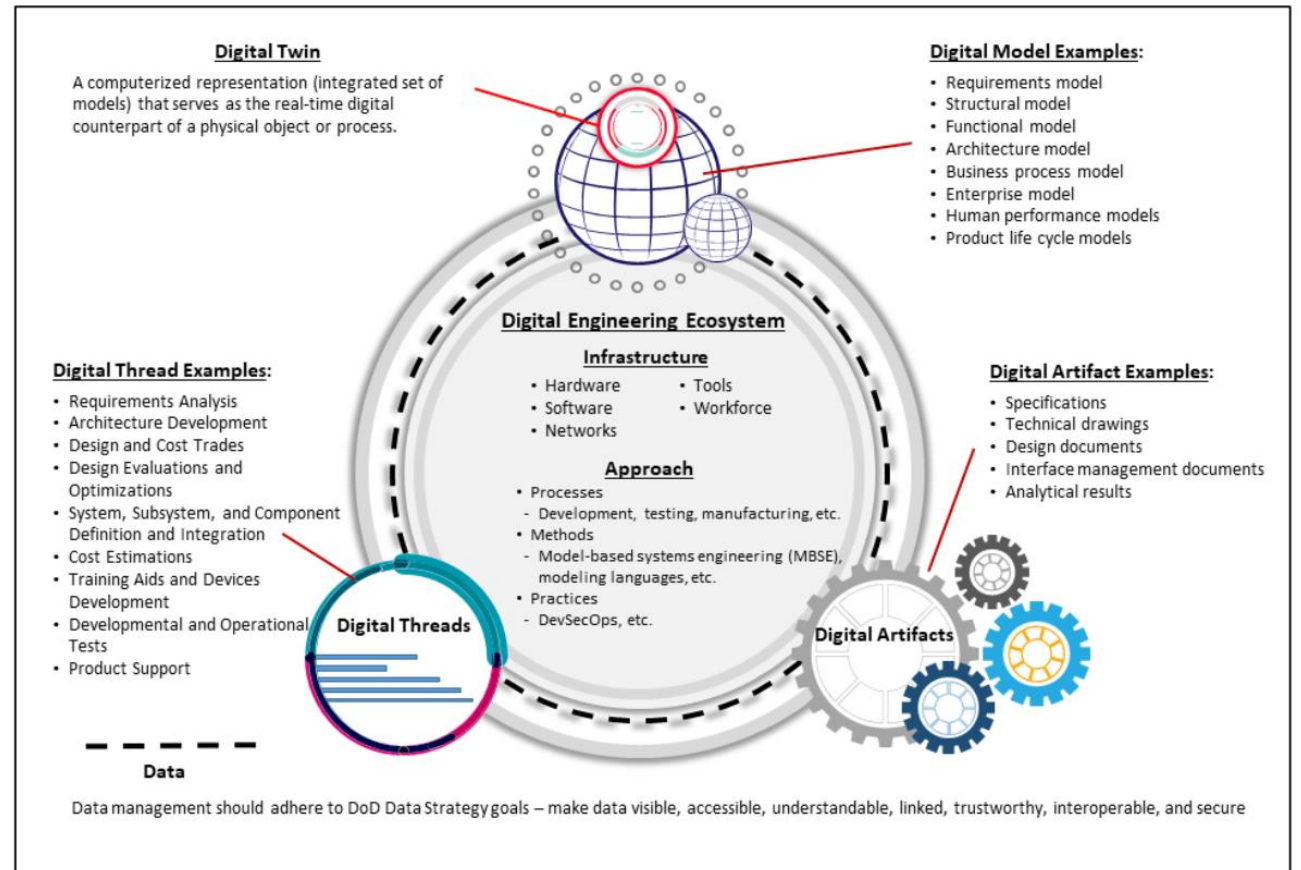
2007 - Standard SysML v1.0  
~ 2010 Développement de méthodes (CESAM, Arcadia ...)  
Passage du document au modèle

## 2018 : Introduction Digital Engineering

2018 – formalisation du concept par le Department Of Defense US  
Généralisation des notions de digital thread et interopérabilité outils (PLM, ALM, MBSE ...)

## 2022 : Introduction de l'IA

IA générative  
Knowledge graphs – ontologies  
IA agentique et ingénierie automatisée



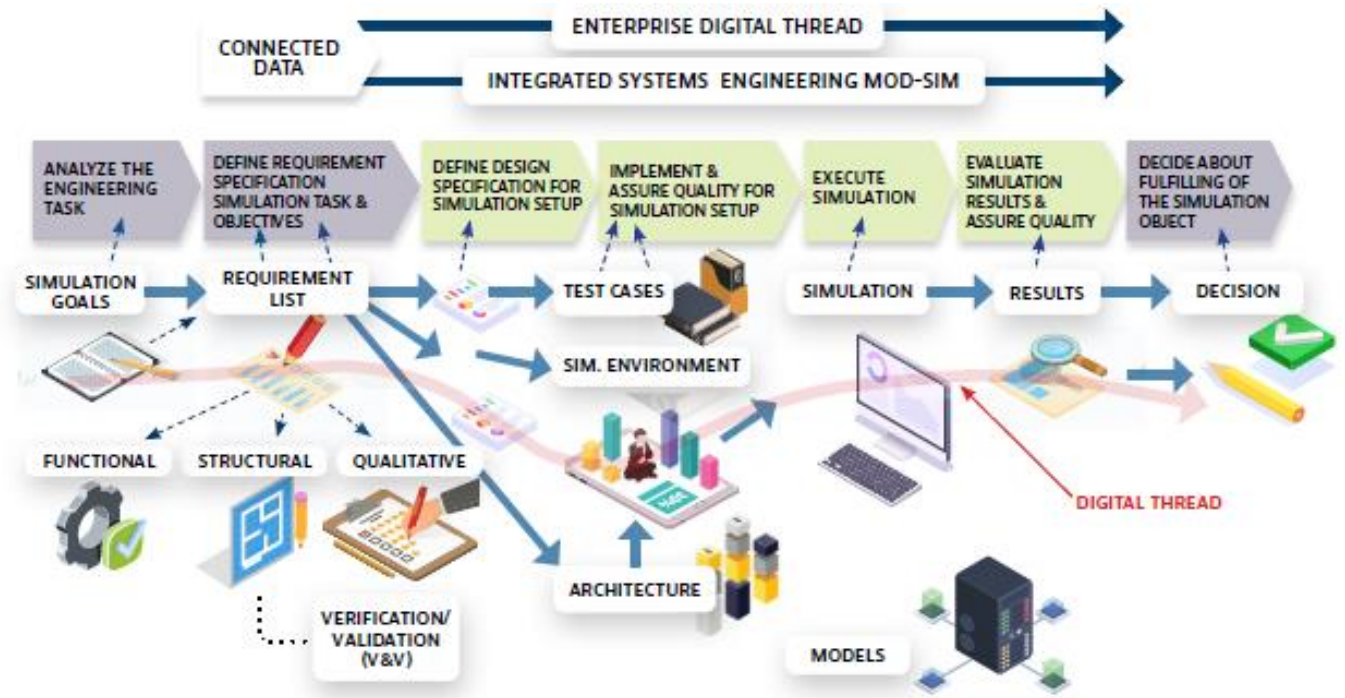
DoD Digital Engineering Framework

# 1.3 Le Model Based comme pivot essentiel

Le développement de ces capacités numérique s'appuie sur les **Modèles** en général, et sur le **Model-Based System Engineering** en particulier, comme pivot **d'intégration** continue et d'analyses en **temps réel** : **Le MBSE** devient un **pilier** très attendu de l'entreprise intégrée

## Vision MBSE INCOSE 2035

- Unified integrated **MBSE-Systems Modeling and simulation (SMS)**
- **Integrated** into enterprise digital thread
- **Integrated** AI Agents
- **Real time** system anomaly detection and virtual systems design updates
- **Integrated** life cycle management systems
- **Agile continuous integration**, build, validation and release



*Vision INCOSE 2035 : future systems engineering is model based*

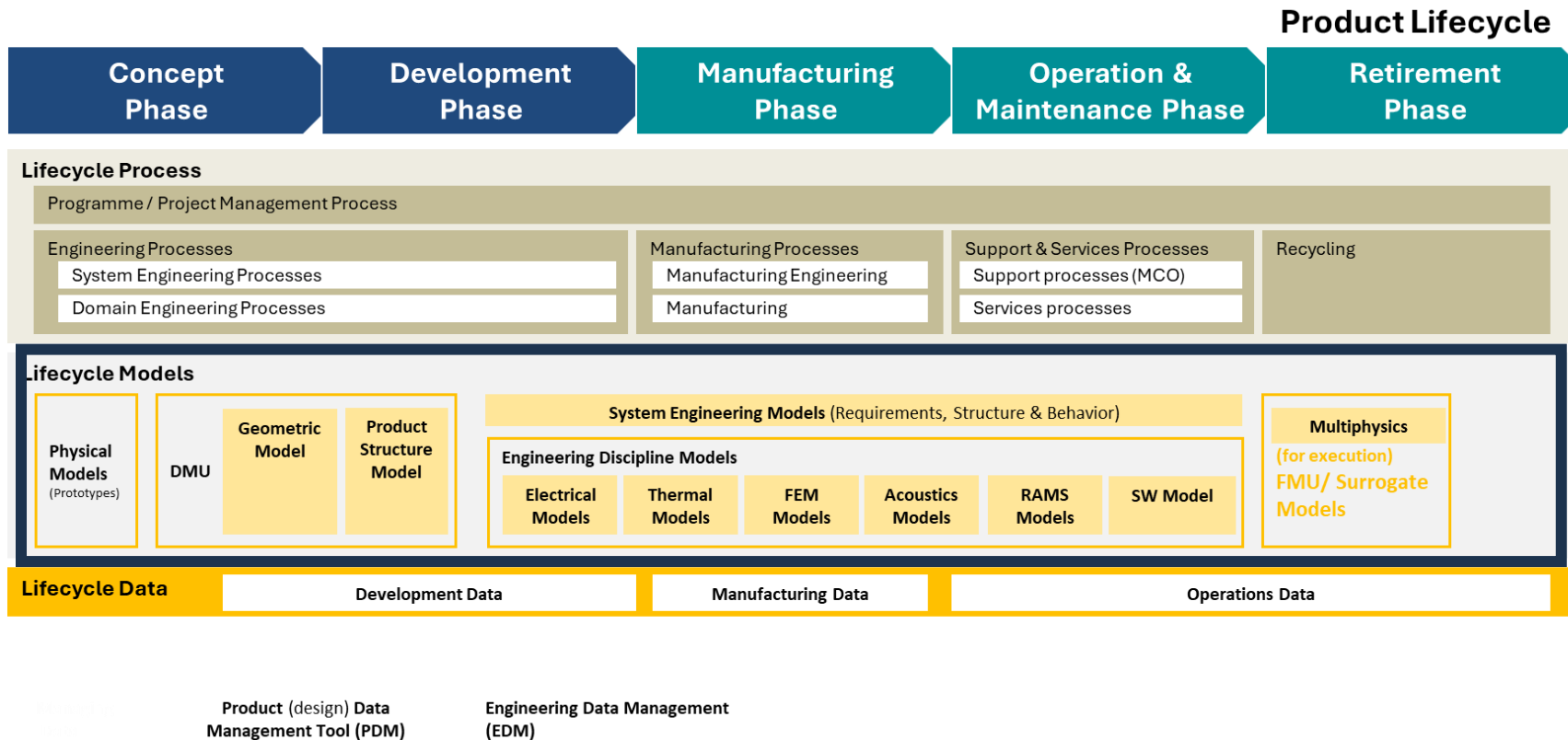
# Table des matières

- Introduction générale
- 1 Emergence du Digital Engineering
- 2 Les défis techniques
- 3 Un besoin d'architecture globale

1. Un territoire morcelé
2. Des standards insuffisants
3. Un MBSE encore en cours de déploiement
4. Des capacités IA limitées

# 2.1 Le problème à résoudre : l'intégration des modèles

La réalité **digitale** des entreprises industrielles aujourd'hui c'est un paysage **très fragmenté d'outils** et de **modèles** tout le long du **cycle de vie produit**



Les **outils** sont multiples

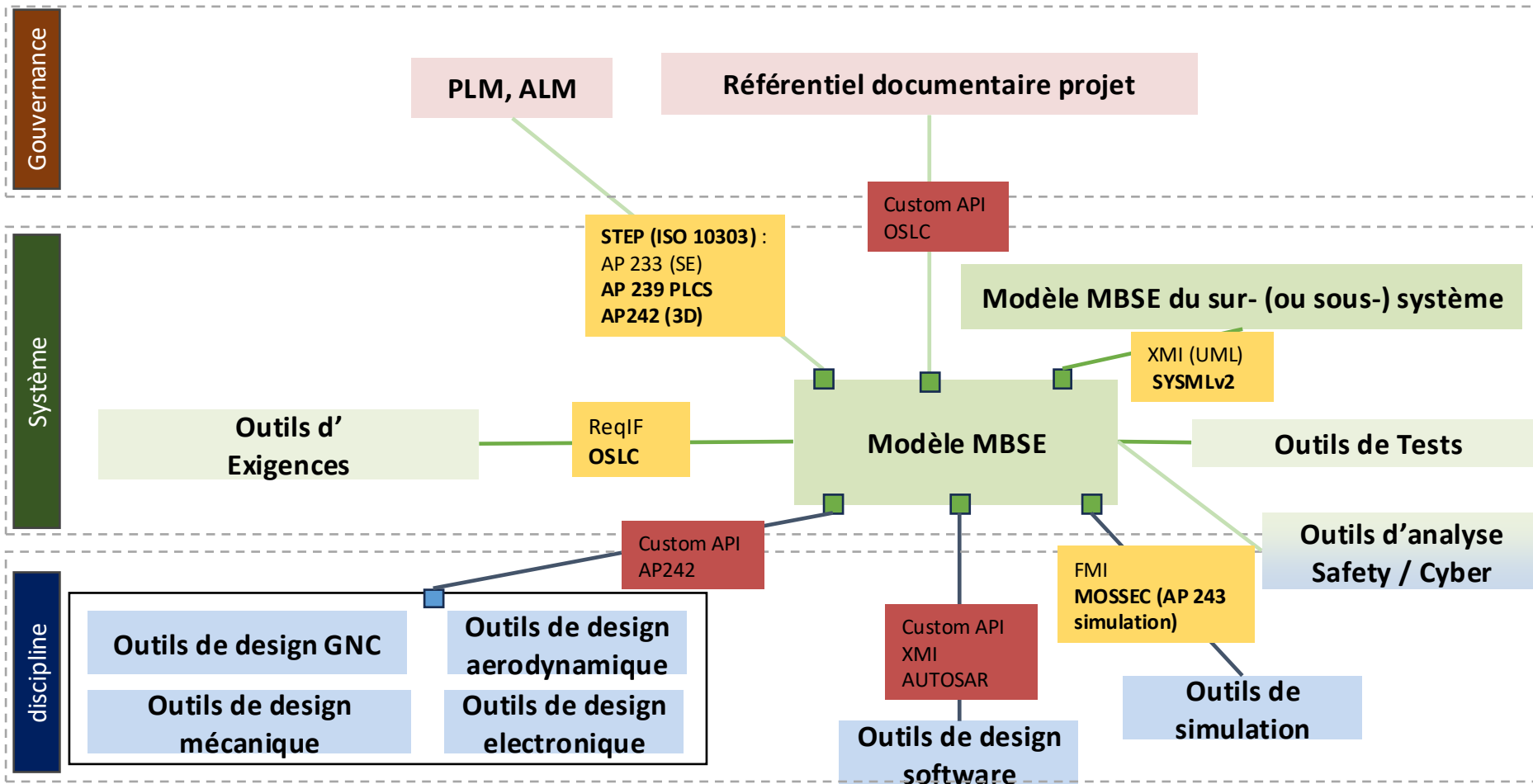
- PLM
- ALM
- MES
- MBSE
- Simulation
- Design
- Data Plateforme ...

L'interopérabilité est **limitée**

- Modèles fragmentés
- Outils déconnectés
- Architectures implicites
- Incohérences et absence de traçabilité

## 2.2 La multiplicité des standards et outils

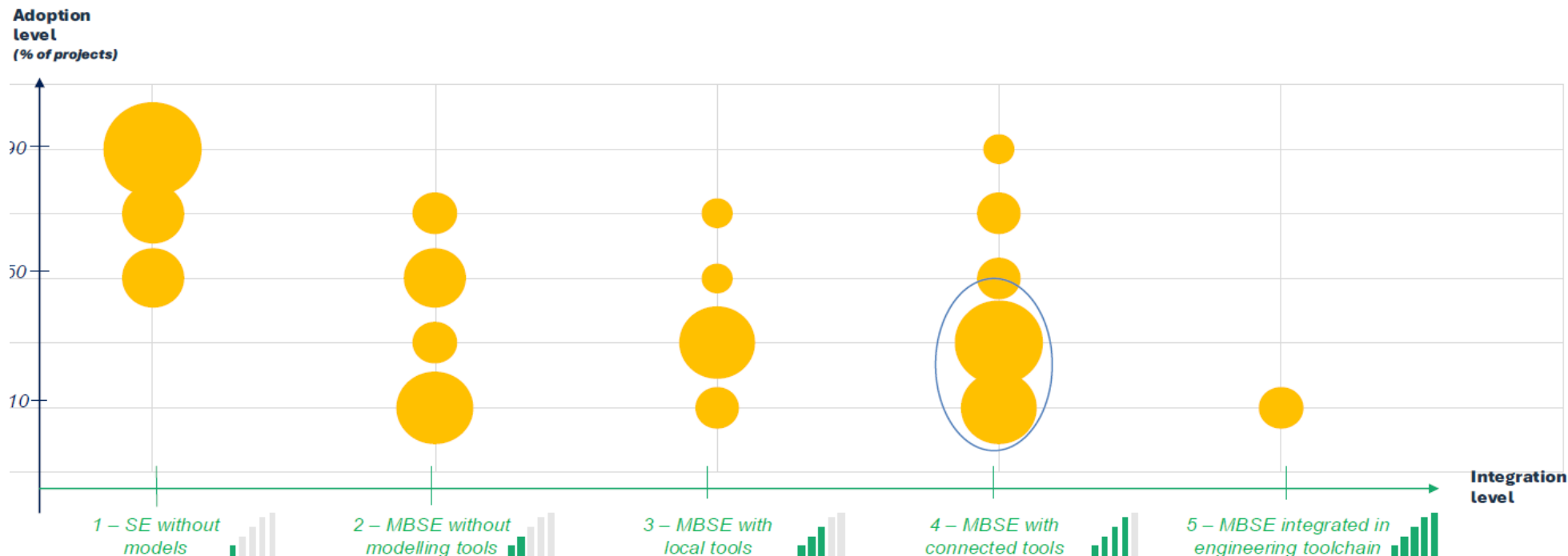
Le **MBSE**, pivot théorique d'intégration des **modèles**, fait face à une multiplicité des **standards** et des **outils** qui limitent leur intégration réelle



Malgré des efforts de standardisation continus depuis plus de 30 ans (ISO STEP, OMG SysML, OASIS OSLC), les standards restent **fragmentés et évolutifs**. Ils ne permettent pas, à ce jour, de garantir une **continuité sémantique complète** à l'échelle du Digital Thread.

## 2.3 Un MBSE encore en phase de déploiement

Le développement futur de ces capacités place le **MBSE** au centre, mais son déploiement réel dans les entreprises est encore partiel. Les freins sont **sociologiques** avant d'être **techniques**



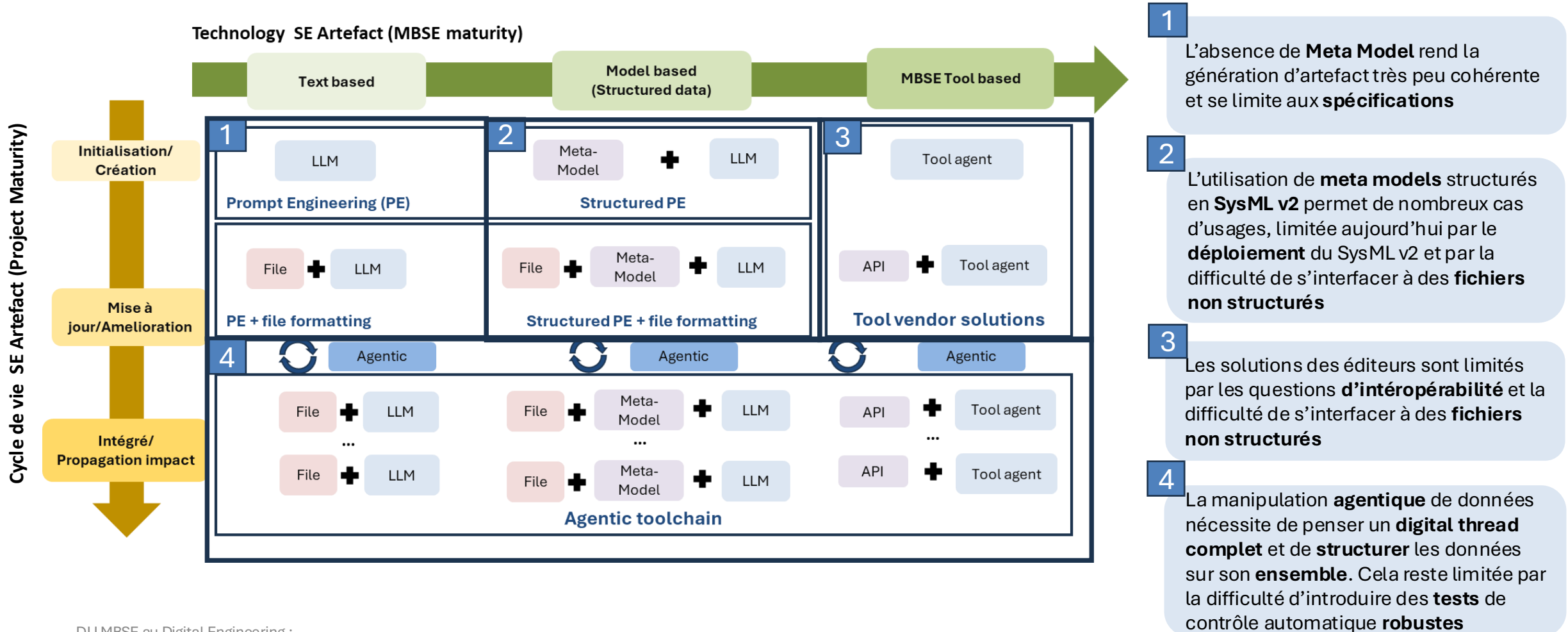
Les trois freins qui ressortent de la littérature (Mc Dermott et al. 2020) et confirmés par le forum **MBSE 2025** :

- **Résistance** culturelle
- **Compétences** et formation
- Manque de **sponsor impliqués**

Observatoire CESAMES 2025 : adoption du MBSE

## 2.4 L'IA generative en support au SE : une technologie en maturation

La mise en œuvre et les apports de l'IA sont variables en fonction de la maturité du processus MBSE et de la maturité des projets. Le manque de **structure** des données et les difficultés de **validation automatique** limitent encore son déploiement efficace à grande échelle



**1** L'absence de **Meta Model** rend la génération d'artefact très peu cohérente et se limite aux **spécifications**

**2** L'utilisation de **meta models** structurés en **SysML v2** permet de nombreux cas d'usages, limitée aujourd'hui par le **déploiement** du SysML v2 et par la difficulté de s'interfacer à des **fichiers non structurés**

**3** Les solutions des éditeurs sont limités par les questions d'**interopérabilité** et la difficulté de s'interfacer à des **fichiers non structurés**

**4** La manipulation **agentique** de données nécessite de penser un **digital thread complet** et de **structurer** les données sur son **ensemble**. Cela reste limitée par la difficulté d'introduire des **tests** de contrôle automatique **robustes**

# Table des matières

- Introduction générale
- 1 Emergence du Digital Engineering
- 2 Les défis techniques
- 3 Un besoin d'architecture globale

1. Un problème d'architecture d'entreprise
2. De bonnes pratiques à suivre
3. L'Architecte a de nouvelles casquettes

# 3.1 Le role structurant de l'architecture d'entreprise

Pour résoudre ces difficultés d'intégration d'outils, la **technique** ne peut pas suffire seule. C'est un sujet **d'architecture** à traiter au niveau de l'entreprise : Il s'agit d'un problème complexe **transversal** et **multi-domaines**, qui repose avant tout sur **l'organisation**, les **interactions** et la **collaboration** entre acteurs. Ces approches ont encore une pénétration **limitée** dans l'industrie.

**L'intégration** échoue parce que les mondes **métier** et **IT** évoluent séparément.

Le système métier porte les **objectifs**, la **valeur** et les **besoins**

le système d'information porte les **solutions** et leur **mise en œuvre**.

Entre les deux, le lien est souvent **fragile** et les **choix techniques** peu justifiés au regard de la **valeur**.

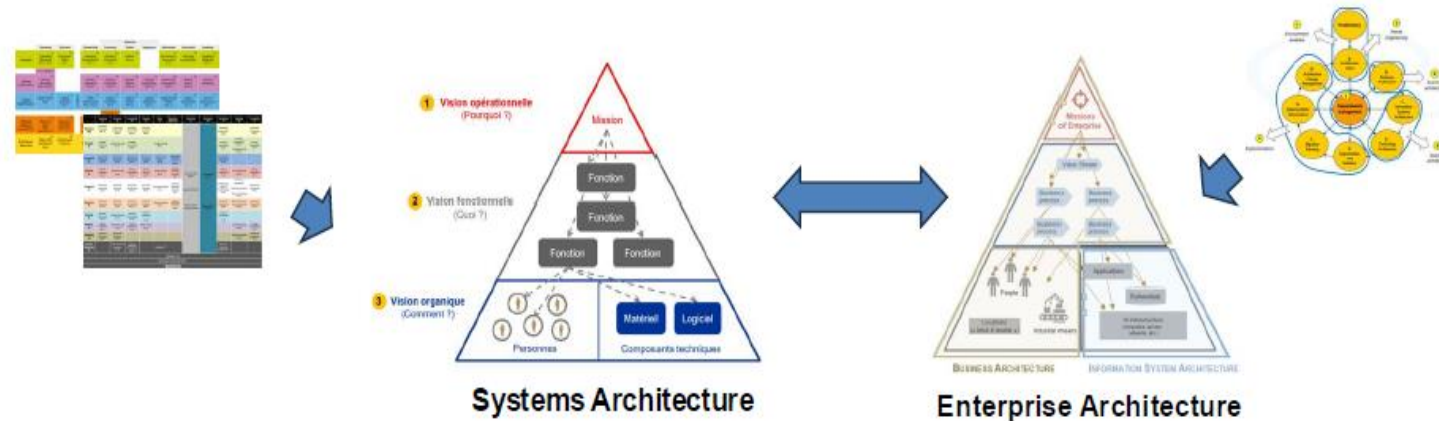


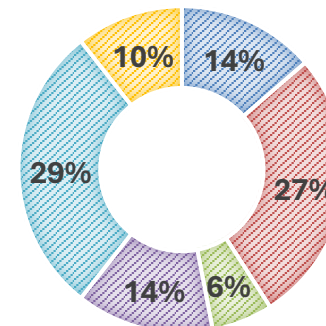
Illustration d'un cadre d'Entreprise Architecture

**L'architecture d'entreprise** comme espace de mise en cohérence

Chercher à unifier les **langages** ou les **ontologies** est illusoire. Chaque domaine porte sa propre vision du **système**. L'enjeu est plutôt de créer un **cadre architectural** partagé, suffisamment simple, qui permette à ces visions de **coexister**, de **dialoguer** et de se **coordonner**. Ce sont des pratiques pourtant encore **limitées** au sein des entreprises industrielles

Pour adresser la problématique de chaîne outillée de bout en bout, des pratiques d'architecture d'entreprise (architecture système appliquée au processus de conception) sont-elles mises en place?

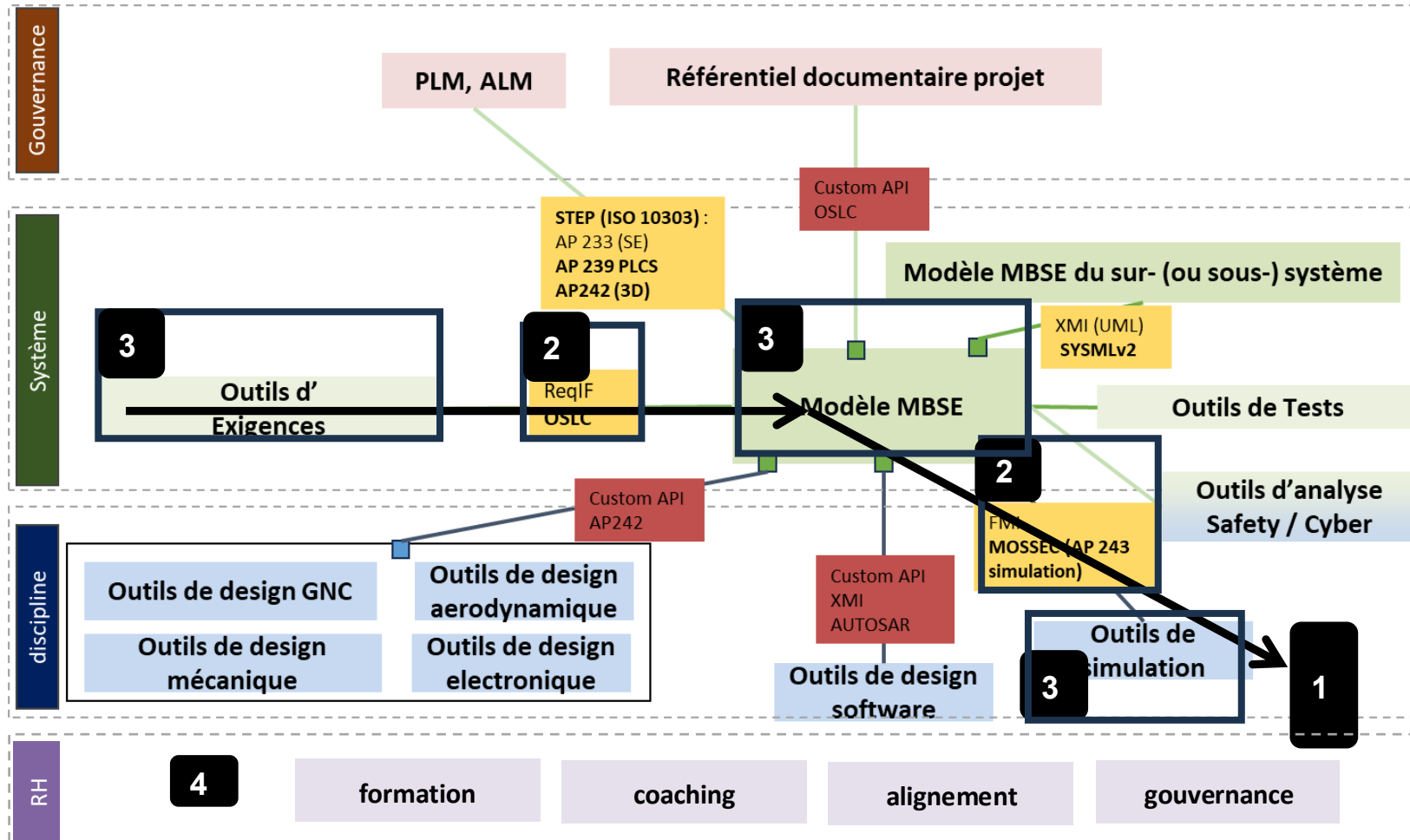
(Observatoire du MBSE en France – CESAMES 2026)



- Oui, localement
- Oui, nos projets de transformation digitale sur l'ingénierie font appel à cette discipline
- Oui, et nous formons de manière récurrente nos ingénieurs à cette discipline.
- Non, et je ne connais pas (ou pas bien) cette discipline
- Non
- Ne sais pas

## 3.2 Vers une ingénierie digitale architecture-centric

La mise en œuvre du **Digital Engineering** est une **transformation** qui doit être orientée **besoin** avant d'être orientée **solution** : Ca ne sert à rien d'**automatiser** ce qui ne **marche pas** !



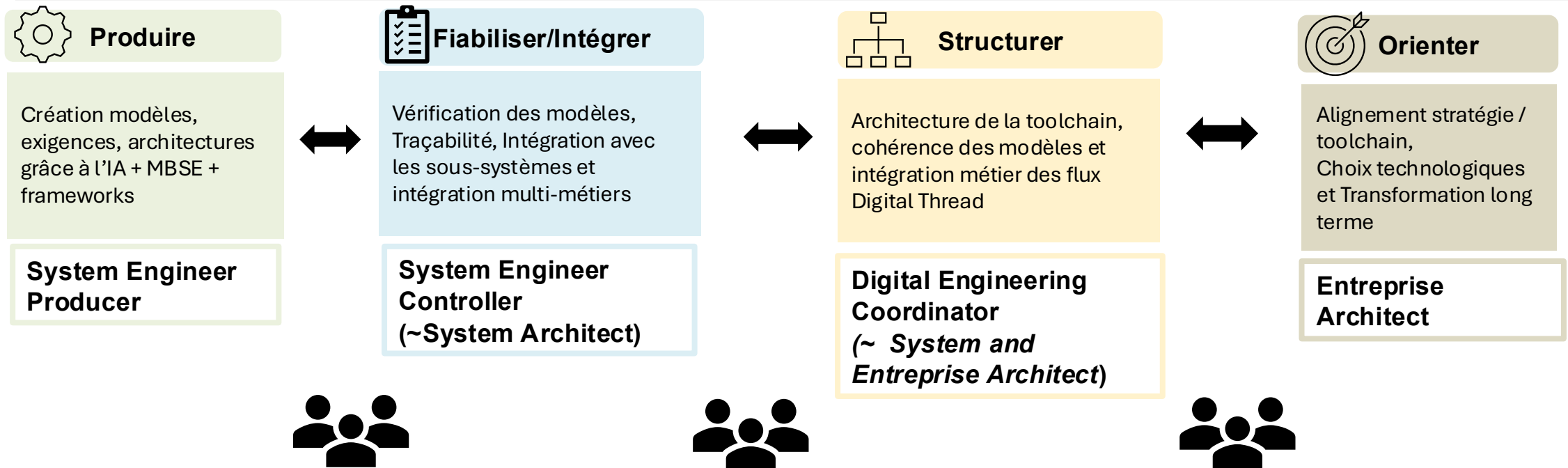
### Principes de mise en œuvre

- 1 Clarifier les **besoins** au niveau de l'entreprise et identifier les **digital threads** prioritaires
- 2 Choisir des **standards** et **outils adaptés** à son contexte industriel et à ses **use cases** prioritaires
- 3 Structurer ses **modèles** en **cohérence** et simplifier la **sémantique** de manière volontaire et partagée
- 4 **Former** et créer une **culture** interne durable

Le **risque** : être tool centric et standard centric

### 3.3 Intégrer de nouveaux architectes

L'ingénierie digitale va simplifier et augmenter la création de **modèles**, accroissant également la quantité de **donnée** à traiter par un ingénieur : Le défi se déplace vers leur **cohérence**, leur **intégration** et leur alignement avec la **stratégie**, à travers la **collaboration** entre plusieurs rôles d'**architectes**.



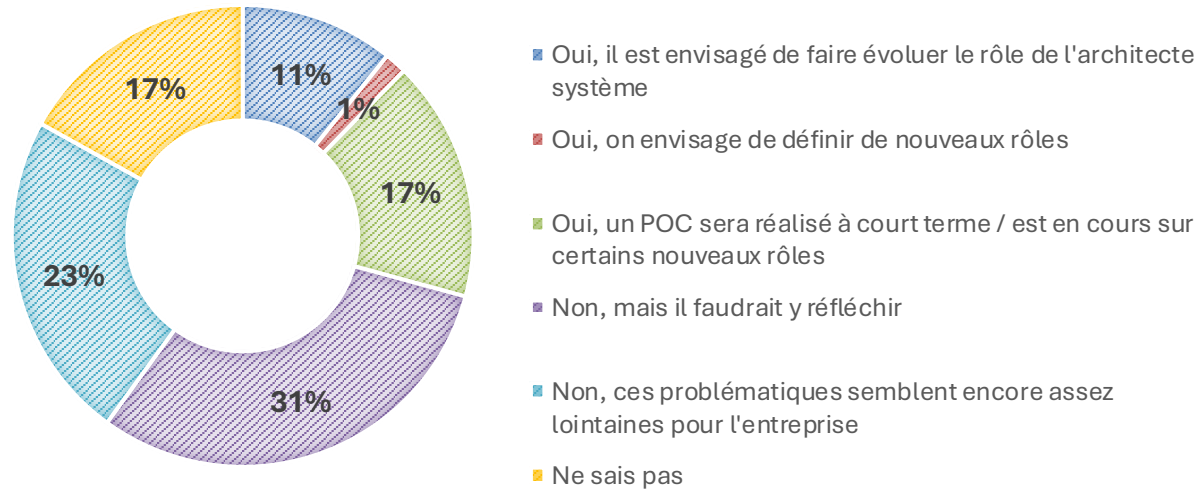
Plus de rôles d'architectes c'est à la fois plus d'**expertises** mais aussi plus de **collaboration**, d'**intégration** et de **convergence humaine** : il va falloir apprendre à se parler !

# DU MBSE au Digital Engineering : l'architecture comme colonne vertébrale

6.4

Le rôle de l'architecte système et des différents acteurs MBSE sera amené à évoluer avec l'industrialisation du MBSE, son intégration dans une chaîne plus large et l'avènement de l'IA. Ces réflexions quant au futur rôle de l'architecte sont-elles en cours?

Observatoire du MBSE en France – CESAMES 2026



**Merci pour votre attention !**

**Et vous, comment voyez-vous évoluer le rôle de l'architecte ?**

# Contact

Gauthier Jourdain

[gauthier.jourdain@cesames.net](mailto:gauthier.jourdain@cesames.net)

C.E.S.A.M.E.S. Institut

SAS au capital de 1.070.000 euros

SIRET : 529 638 314 00052

Siège social : 10, rue de Penthièvre – 75008 PARIS

*Bureaux Paris / Toulouse / Lyon*

